

논문 2004-41CI-2-11

퍼지 제어기를 이용한 터널 굴진기의 자동제어에 관한 연구

(A Study on Automatic Control of Microtunneling System based on Fuzzy Controller)

도 준 형*, 한 정 수*, 강 영 훈*, 변 증 남**, 남 장 현***, 박 태 동 ***

(Jun-Hyeong Do, Jeong-Su Han, Young-Hoon Kang, Zeungnam Bien, Jang-Hyun Nam, and Tae-Dong Park)

요 약

본 논문에서는 터널 굴진기의 모든 조작이 시스템 운용자에 의해 수동으로 운용 되고 있는 방법을 개선하여 터널 굴진기의 토크/추력 및 송/배니압을 자동으로 제어하는 방법을 제안한다. 이를 위하여 본 연구에서는 굴진 운용자의 토크/추력 및 송/배니압의 수동 제어 방법에 대해 체계적인 분석을 하였고 이를 바탕으로 퍼지 제어기와 경고 및 긴급 정지를 위한 제어기를 설계하였다. 제안된 시스템은 전문가 규칙으로부터 퍼지 규칙을 추출하였기 때문에 시스템 운용자들의 숙련된 제어 방법을 그대로 따르면서 시스템의 변화에 신속하게 대응할 수 있다. 따라서 복잡한 환경에서 전문가의 역할을 대신할 수 있으며 기존에 운용자의 인지능력의 한계로 인해 시스템의 상태 변화에 빠르게 대응하기 어려웠던 점을 해결할 수 있다.

Abstract

In this paper, we propose the automatic control algorithm of torque/pipejacking thrust and slurry charging/discharging pressure in the microtunneling system to assist operators assuring the quality of microtunneling construction. To develop this algorithm, we analyze the microtunneling system which is manually controlled by expert and design fuzzy controller, warning system, and halt sensing system. The proposed automatic tunneling algorithm shows good tunneling results comparable with those of experts.

Keywords : Microtunneling system, Automatic control, Fuzzy controller

I. 서 론

광케이블 전용의 무인 통신구를 건설하기 위한 마이크로 터널링 시스템에서 터널링 관리 시스템의 역할은 매우 중요하다. 현재 터널링 관리 시스템의 역할은 터널링 작업에서 이루어지고 있는 여러 가지 굴진 정보를 수집하고 저장하는 것과 이러한 정보들을 운용자에게 제공하여 보다 효과적으로 장비를 운용하는 것을 돕는데 있다. 현재 운용자는 터널링 관리 시스템에서 제공된 정보와 이에 대한 경험적 지식을 바탕으로 시스템을 운용하고 있는데, 보다 효율적인 굴진 작업을 위해서는 시스템의 상태와 작업 상태를 알 수 있는 센서 시스템을 보완

* 학생회원, KAIST 전자전산학과 전기및전자공학전공
(Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, KAIST)

** 종신회원, KAIST 전자전산학과 전기및전자공학전공
(Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, KAIST)

*** 정회원, KT 기술연구소 네트워크 인프라 연구팀
(Network Infra Research Team, Technology Laboratory, KT)

※ 본 연구는 KT의 지원으로 수행되었음.

접수일자: 2003년4월25일, 수정완료일: 2004년3월2일

하고 이로부터 수집되는 정보를 과학적으로 분석하여 운용할 수 있는 자동화 제어기술의 도입이 필요하다. 지금까지 터널링 관리 시스템의 자동화와 관련되어 진행된 연구들을 살펴보면, 터널링 굴진기의 자동 경로 제어나 굴진기 전방에 존재하는 장애물을 자동으로 회피하는 시스템에 관한 연구들이 주로 이루어 졌다^[1,2,3].

이에 반해 송/배니압, 토크/추력 등 지속적으로 변화에 집중하여야 하는 부분의 자동화 연구에 대해서는 아직까지 시도되지 않고 있다. 또한 굴진작업에서 굴진 운용자는 굴진기의 작업환경인 토질이 워낙 다양하기 때문에 발생하는 갑작스런 변화에 신속히 대처해야 한다. 하지만 굴진 운용자가 항상 시스템의 변화를 집중하여 관찰한다는 것은 매우 어려운 일이며 사람의 인지능력과 판단능력의 한계로 인해 시스템의 변화에 신속히 대처하는데 한계가 있다. 따라서 운용자가 항상 관찰하고 변화에 따라 적절한 제어를 해 주어야 하는 부분인 토크/추력, 송/배니압 제어 부분을 자동화 하여 굴진 작업의 효율성과 안정성, 그리고 정확성을 높이는 동시에 시스템 운용자에게 편의를 주는 것이 필요하다.

본 연구에서 굴진기의 모든 조작을 수동으로 하는 것을 개선하여 토크/추력 및 송/배니압을 자동으로 제어할 수 있는 퍼지 기반 자동제어 알고리즘을 제안한다.

II장에서는 마이크로 터널링 시스템과 토크/추력, 송/배니압을 제어하기 위한 기본 개념에 대해 언급한다. III장에서는 퍼지 제어를 기반으로 하는 토크/추력 및 송/배니압 제어에 대한 자동 알고리즘을 제안하고 IV장에서는 실험 결과를, V장에서는 결론 및 추후 과제에 대해 서술한다.

II. 마이크로 터널링 시스템의 토크/추력 및 송/배니압 제어

1. 마이크로 터널링 시스템의 구조

마이크로 터널링 시스템은 그림 1과 같이 굴진기, 추진관, 원압 추진 시스템, 토사/암편분리 시스템, 송/배니 시스템, 원격 제어 시스템으로 구성된다. 굴진 방법은 굴진기를 수직 작업구 내에 투입시킨 후 굴진기의 전단부에 장착되어 있는 굴착용 커터 헤드를 회전시키면서 원압 추진 시스템을 이용하여 굴진기를 밀어주는 방식이다. 초기에 원압 추진 시스템으로 굴진기를 일정거리 밀어 주고 난 다음, 추진책을 후퇴시켜 굴진기와 추진책 사이에 추진관을 삽입하고 추진책으로 추진관을 밀어 주는

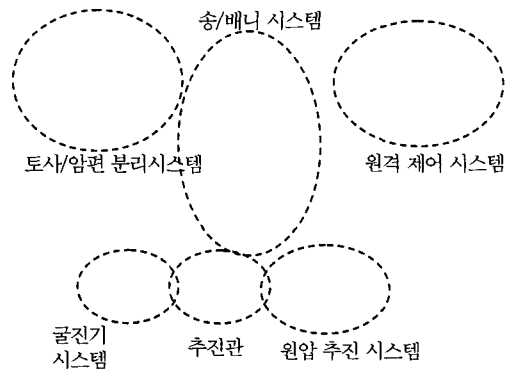


그림 1. 마이크로 터널링 시스템.

Fig. 1. Microtunneling System.

것을 반복한다. 이때 발생하는 굴진토는 송/배니 시스템에 의해서 터널 밖으로 운반된다.

이므로 터널링 시스템의 자동화를 위해 필요한 제어는 굴진기의 경로 제어, 토크/추력 제어, 송/배니압 제어, 이수 농도 제어 등의 4가지로 분류 할 수 있다. 굴진기의 경로 제어는 마이크로 터널링 시스템이 정해진 경로를 따라 굴진 되도록 제어하는 것으로 현재 많은 연구가 진행 중이다^[1,2,3]. 토크/추력 제어는 굴진기의 커터가 회전 시 발생하는 토크가 정격 내로 유지되면서 굴진속도가 송/배니 시스템에서 처리할 수 있는 범위 내에서 유지되도록 추력을 제어하는 것으로 시스템의 안정성에 큰 영향을 준다. 송/배니압 제어는 굴진 시스템이 굴진한 굴진토를 굴진하고 있는 터널 밖으로 효율적으로 운반하도록 송/배니 펌프를 조절 하는 것이다. 이를 위해 이수 가압식 방법을 사용한다. 이수 농도 제어도 송/배니압 제어와 마찬가지로 굴착 토사/암편을 효율적으로 터널 밖으로 운반하는 것이 목적이며 굴착 토사/암편이 이수에 잘 섞여 나오기 쉽게 이수의 점성이나 비중을 제어하는 것이다. 이 4가지 제어 중 토크/추력과 송/배니압 제어는 굴진 진행 과정에서 운용자의 지속적인 모니터링과 신속한 대처가 필요한 작업이기 때문에 전체 마이크로 터널링 시스템에서 자동화가 가장 필요한 부분이다.

* 이수 가압식은 굴착된 토사/암편이 막장 안으로 들어오면 송니관을 통해 막장 안으로 이수를 공급하고, 굴착토와 혼합된 이수를 배니관을 통하여 배출함으로써 막장 안의 압력을 적절히 유지하여 지반의 침하나 용기를 방지하는 방법이다. 이때 굴착 토사/암편에 이수가 잘 섞일 수 있도록 이수의 점성과 비중을 적정하게 맞추는 것이 중요하다.

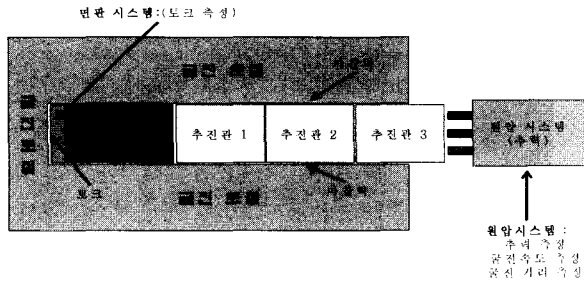


그림 2. 토크/추력 제어에 대한 시스템 구성.
Fig. 2. System configuration of the torque/ pipejacking thrust control.

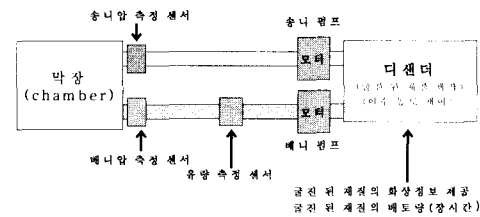


그림 3. 송/배니 시스템 구성.
Fig. 3. System configuration of the slurry charging /discharging pressure control.

2. 토크/추력 제어의 기본 개념

토크/추력 제어에 대한 시스템 구성은 그림 2와 같다. 굴진기와 원압 추진 시스템 사이에 추진관이 삽입되어서 원압 시스템이 추진관을 밀어주면 그 추진력이 추진관을 거쳐 굴진기의 후방통에 전달되고 이 힘이 굴진면과 접촉되어 있는 면판에 전달된다. 추력을 전달받은 면판과 면판에 장착되어 있는 비트들에 의해 굴착이 되면 면판과의 굴착면 사이에 토크가 발생하고 이를 피드백하여 원압 시스템의 추력을 제어하는데 사용한다.

토크/추력 제어의 가장 중요한 목적은 시스템이 손상되지 않도록 토크를 유지하는 것이다. 두 번째 목적은 굴진되는 재질의 양이 송/배니 시스템이 처리할 수 있는 한계치 내에 있도록 굴진속도를 유지하는 것이다. 그렇지 않으면, 터널링 시스템의 막장이 막힌다거나 배니관이 막히게 되어 효율적인 작업을 할 수 없다. 즉, 암반층을 굴진 할 때에는 주로 굴진면과 접촉되어 있는 면판에 굉장히 큰 토크가 걸리게 되므로 이 토크가 한계토크를 넘지 않도록 추력을 제어해야 한다. 반면 토사층을 굴진 할 때는 면판에 걸리는 토크는 다소 작기 때문에 추력을 많이 가해 굴진 시스템이 빠르게 굴진을 해야 한다. 하지만 굴착 토사/암편이 터널 밖으로 제대로 배토 되지 않으면 굴진기의 막장 안이 쌓이고 배니관이 막히게 되어 굴진이 잘 되지 않는다. 따라서 굴진하는 토질이 암반층이면 시스템에 손상을 주지 않는 안정한 토크의 유지에 중점을 두면서 추력을 제어하고, 토사나 점토층의 경우에는 굴진속도에 중점을 두면서 추력을 제어해야 한다.

3. 송/배니압 제어의 기본 개념

송/배니 시스템은 디센터 플랜트와 막장 그리고 둘

사이에 이수를 운반하는 통로인 송니관과 배니관, 그리고 송니 펌프와 배니 펌프로 구성된다(그림 3).

송/배니 시스템은 송/배니관에 흐르는 이수의 속도, 즉 유량을 유지해서 굴착토를 배토 시키고 적절한 송/배니압을 유지함으로써 막장의 안정성을 도모한다. 이수의 속도(유량)가 너무 낮으면 굴착 토사/암편이 이수에 의해서 이끌려 나오지 못하고 막장이나 송/배니관에 쌓여서 막히게 되므로 항상 어느 정도의 유량과 송/배니압을 유지해야 한다. 송/배니압 제어의 기본 방식은 (그림 4a)에서 보듯이 굴진한 양만큼의 굴착토를 송/배니 시스템에서 배토를 시켜주는 것이다. 즉, 굴진한 양보다 배토되는 양이 적으면 막장이나 배니관에 굴착토가 쌓여서 막힐 수 있으므로 송/배니 펌프의 속도를 증가시켜 송/배니압을 높이고 유량을 증가시켜서 배토량을 증가시킨다. 그러나 현재 개발한 굴진 시스템에는 배토량을 측정할 수 있는 센서가 부착되어있지 않아 배토량을 직접적으로 측정할 수 없다. 따라서 (그림 4b)와 같이 송/배니압의 변화로부터 배토량을 간접적으로 추정하여 굴착 토사/암편이 막장 안에 쌓이는지 여부를 예측한다.

도질별로 송/배니압을 고려해 보면, 우선 암반의 경우에는 면판에 걸리는 토크가 크기 때문에 굴진속도를 높일 수 없다. 굴진속도가 낮으면 굴진 되는 재질의 양이 적기 때문에 굴착 토사/암편이 이수에 섞일 수 있도록 점성만 조금 크게 해 주면 문제가 발생하지 않는다. 토사의 경우에는 송/배니압의 제어에 보다 많은 주의를 기울여야 한다. 토질이 약하기 때문에 송/배니압이 높으면 굴착 토사/암편 뿐만 아니라 굴진면 주위에 있는 토사까지 함께 배출될 우려가 생기게 된다. 만일 이런 현상이 발생하면 굴진기 주위의 토사가 배출되어 빈 공간이 발생하고 결국에는 지반이 무너져 내려 앉게 된다.

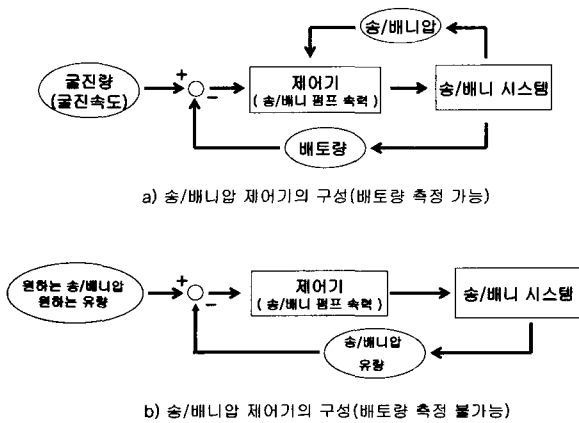


그림 4. 송/배니압 제어기 구성.
Fig. 4. Block diagram of slurry charging/ discharging pressure control system.

이런 현상을 감지하기 위해서 굴진속도에 비해 배토 되는 양이 많은지를 고려한다. 만일 굴진 속도에 비해 배 토 되는 양이 많은 경우 약품을 이수에 섞어서 굴진면 의 점성을 증가시킴으로써 굴진면 주위가 단순히 이수 에 쓸려 나오는 것을 막고, 송/배니압을 낮추어서 굴진 면 주위가 무너지는 것을 막아야 한다. 반면, 토사 중에 서도 자갈이나 모래의 경우에는 무거워서 이수에 의해 서 배출되지 않고 쌓여서 막장이나 배니관을 막을 가능 성이 있다. 이런 경우에는 송/배니압을 조금 높이고 이 수의 비중을 높여 자갈이나 큰 모래를 띄워 준 다음 이 를 플랜트로 배출시킨다.

III. 토크/추력 및 송/배니압의 자동제어 알고리즘

1. 퍼지 제어기의 특징

퍼지 이론은 시스템의 동특성이 비선형인 시스템, 수 학적 모델을 정확히 구하기 어려운 시스템, 또 어렵게 모 델링 하였다 하더라도 얻은 파라미터 값이 시스템의 출 력에 따라 변하게 되어 종래의 제어 이론으로는 만족할 만한 성능을 구현할 수 없는 제어기에 효과적으로 사용 된다. 자동제어에 있어서 퍼지이론의 기술적 장점으로는 전문가 지식을 손쉽게 수용-기계화하여 보다 높은 차원 의 자동화 시스템 구현이 가능한 점, 외란이나 파라미터 변화에 대해 기존의 제어방법보다 강인한 성능을 보여 준다는 점, 내재된 비선형성 때문에 선형 제어기에 비해 효과적인 제어가 가능한 점, 많은 경우 비선형 프로세서 의 제어에 효과적으로 대처할 수 있다는 점 등이 있으며 시스템의 구현 개발 측면에서 보면 설계 기술을 배우기

가 쉽기 때문에 개발비 및 유지비가 적게 든다는 장점을 가진다. 특히 이러한 장점들은 사람이 손으로 작동을 하 는 휴먼인더룹 (Human-in-the-loop) 시스템이나 정확 성보다는 빠른 대응성이 요구되는 시스템, 그리고 현재 선형제어 알고리즘에 의해서 제어되고 있으나, 그 성능 이 만족스럽지 못하여, 운용자 혹은 프로세스 엔지니어 들이 불만스러워 하는 플랜트 등에 적용이 가능하다^[4]. 실제로도 시멘트 제조공정^[5], 전동차의 자동운전 시스템 ^[6], 천정 크레인^[7] 등의 시스템에 퍼지 제어가 매우 효과 적으로 적용되고 있다.

마이크로 터널링 시스템에서는 굴진 작업시 토질의 다양성으로 발생하는 갑작스러운 변화에 대해 신속하게 대처할 수 있는 자동 제어 시스템이 필요하나, 토질의 특성에 따라 굴진 시스템의 상태가 불규칙적으로 변화 하기 때문에 터널 굴진 시스템을 수학적으로 모델링하 고 이를 분석하여 제어기를 설계한다는 것은 매우 어렵 다. 따라서 굴진기 운용자들의 전문적인 경험적 지식들 을 그대로 적용하여 자동적으로 동작할 수 있는 제어 방법이 필요하다. 이러한 마이크로 터널링 시스템의 자 동 제어를 위해 필요한 요건들은 퍼지 제어기가 성공적 으로 적용되고 있는 3가지 플랜트 특성과 매우 유사하 다. 따라서 마이크로 터널링 시스템의 토크/추력, 송/배 니압의 자동 제어 알고리즘을 구현하기 위해 퍼지 이론 을 이용하여 굴진기 운용자들의 제어 방법을 그대로 따 라 할 수 있는 퍼지 제어기와 예기치 못한 위험 상황이 발생할 경우 시스템의 작동을 자동으로 중지시키기 위 한 제어기를 제안한다.

2. 토크/추력 및 송/배니압의 자동제어 알고리즘

그림 5는 제안한 터널 굴진기의 자동제어 알고리즘 구 조를 나타낸다. 제어기는 크게 경고 및 긴급 정지 감지 시스템과 퍼지 제어기로 구성되어 있으며 토크/추력 과 송/배니압을 자동으로 제어하기 위해 제어기 입력으 로 토크, 추력, 송/배니압, 유량, 굴진 속도 정보를 사용 한다.

먼저 경고 및 긴급 정지 감지 시스템에서는 운용자가 주의를 기울여야 할 상황과 제어가 불가능한 상황을 판 단한다. 운용자가 주의를 기울여야 할 상황에서는 경고 를 주어 운용자가 주위 깊게 굴진 상황을 관찰하거나 수 동 모드로 전환하여 운용자가 직접 굴진기를 제어하도록 하고 제어가 불가능한 상황에서는 바로 굴진 작업이 정 지된다. 각 위험 상황에 대해서는 다음과 같이 분류되며

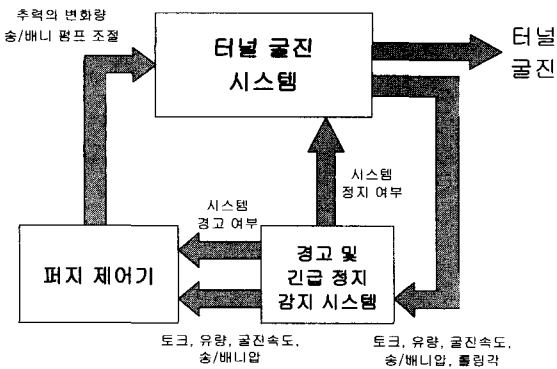


그림 5. 제안한 굴진기의 자동제어 알고리즘 구조.
Fig. 5. Structure of the proposed automatic tunneling algorithm.

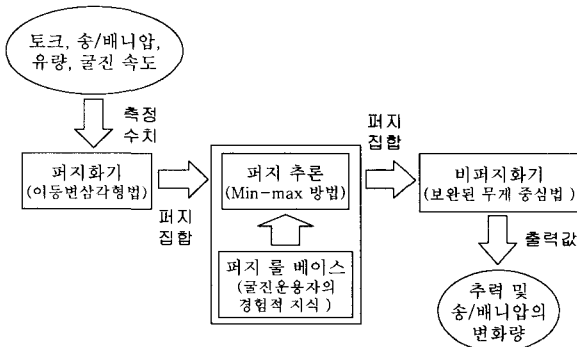


그림 6. 마이크로 터널링 시스템의 퍼지 제어기.
Fig. 6. Fuzzy controller of the microtunneling system.

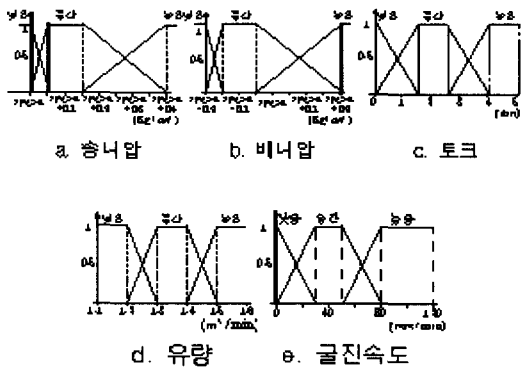


그림 7. 퍼지화를 위한 입력 변수의 소속 함수.
Fig. 7. Membership functions for the fuzzification of input variables.

각 한계 값은 IV장의 파라미터 설정 창에서 입력하게 된다.

- 시스템의 톨링각이 한계를 넘은 경우

- 송/배니압의 차이가 정해진 범위를 벗어나는 경우
- 퍼지 제어기의 입력 값들이 최소/최대 한계치를 넘은 경우

터널 굴진 시스템에서 긴급 정지 상황이 일어나지 않은 상황에서는 제어기 입력 값을 그대로 받아 들여서 퍼지 제어기가 동작한다.

그림 6은 퍼지 제어 자동 알고리즘의 처리과정을 간략화한 블록도로서 퍼지화기 모듈, 퍼지 규칙 기반 모듈, 퍼지 추론 모듈, 비퍼지화기 모듈로 구성된다.

- 퍼지화기 모듈

퍼지화기 모듈은 각각의 수치적 입력 정보를 퍼지 시스템이 이해할 수 있는 퍼지량으로 바꾸는 역할을 한다. 여기서는 운용자의 운용지식을 바탕으로 그림 7과 같이 사다리꼴 형태의 소속함수를 설정하였다. 설정된 소속함수는 굴진 시스템의 종류, 굴진현장의 토질 상태, 운용자의 굴진기 운영 방식에 따라 결정되며 초기 수동 굴진을 통하여 설정 값을 파악 할 수 있다.

- 퍼지 규칙 기반 모듈

퍼지 규칙 기반 모듈은 퍼지 추론을 위해 필요한 규칙들로 II장에서 설명한 토크/추력, 송/배니압 제어의 기본 개념을 바탕으로 굴진기 운용자들의 경험적 지식으로부터 구성하였으며 아래의 예와 같이 표현된다.

규칙 1: 토크가 낮고 유량이 낮고 굴진속도가 낮고 송/배니압이 낮으면, 원압을 높이고 송/배니압을 조금 높인다.

규칙 2: 토크가 낮고 유량이 낮고 굴진속도가 낮고 송/배니압이 중간이면, 원압을 조금높이고 송/배니압을 조금 높인다.

이 퍼지 규칙들은 규칙 자체가 실제 시스템을 운용하는 것이기 때문에 운용자의 굴진 운용 방식이 그대로 적용되어야 한다. 비록 앞에서 언급한대로 토크/추력과 송/배니압 제어방법에 대한 기본적인 제어방법들이 존재하나 굴진기나 굴진현장, 토질 상태, 또는 운용자에 따라서 굴진 방법은 조금씩 다르다. 실제 여러 곳의 굴진현장의 방문을 통한 각 굴진현장에서 운용자와의 면담 및 운용자에 의한 수동굴진 과정을 지켜본 결과, 그들만의 굴진하는 운용 스타일이 조금씩 달랐으며, 굴진기의 종류, 토질의 종류 등 환경적 요인도 제어방법에

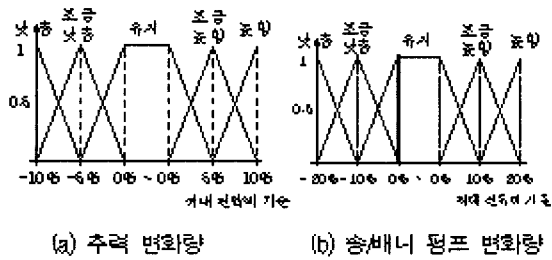


그림 8. 출력 변수의 소속 함수.
Fig. 8. Membership functions of output variables.

많은 영향을 주고 있음을 확인하였다. 따라서 일반적인 자동제어 규칙을 적용할 경우 상황에 따라 굴진기가 의도하지 않은 방향으로 작동할 수 있으며, 일반적인 규칙이 실제 굴진 운용을 담당하는 운용자들의 굴진 운용 방식과 다를 경우 자동 굴진에 대한 운용자의 신뢰성이 떨어지기 때문에 운용자가 굴진기를 자동 굴진 상태로 굴진 시키는 것을 배제하게 된다. 따라서 여기에 퍼지 규칙은 운용자가 직접 입력하여 굴진 시스템이 자신의 운용 방식대로 자동 굴진 되도록 한다.

• 퍼지 추론 모듈

퍼지 추론 모듈은 퍼지 규칙을 이용하여 퍼지 입력에 대한 퍼지 출력을 추론해 내는 장치로서 Mamdani 방법인 Min-max 방법을 사용하였으며 퍼지 출력을 추론하기 위한 출력 변수의 소속 함수는 그림 8과 같다

• 비퍼지화기 모듈

비퍼지화 모듈은 퍼지량으로부터 실제 제어입력의 수치 값을 얻어내는 변환부분으로 기존의 널리 사용되고 있는 무게 중심법과 합 중심법을 수정하여 새로운 방법을 제안하였다. 무게 중심법은 가장 많이 쓰이는 비퍼지화 방법이나 중첩된 면적의 계산이 복잡하여 추론 결과를 얻는데 시간이 오래 걸려 터널 굴진과 같이 실시간 응답이 필수적인 시스템에는 적합하지 않다. 실시간 처리에 적합한 합 중심법은 중첩되는 면적에 대해 중첩되는 수만큼 중복하여 면적계산에 반영하는데, 무게 중심법과 유사하면서도 계산 시간이 빠르다는 장점이 있다. 하지만 중첩되는 수만큼 중복하여 계산을 하므로 firing 되는 룰의 수가 많아질 경우 실제 출력된 값은 중복되는 부분에 치우칠 가능성이 많다.

본 논문에서 제안한 비퍼지화기는 합 중심법에서 firing 되는 규칙의 수만큼 중첩되는 면적을 모두 계산에

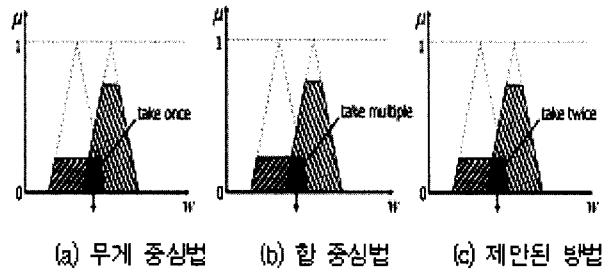


그림 9. 비퍼지화 방법 비교.
Fig. 9. Comparison of defuzzification methods.

고려하는 것이 아니라 그 중첩되는 면적 중에서 가장 작은 면적을 택하도록 하였다 (식 (1), 식 (2), 식 (3)).

무게 중심법:
$$U_0 = \frac{\int w\mu(w)dw}{\int \mu(w)dw} \quad (1)$$

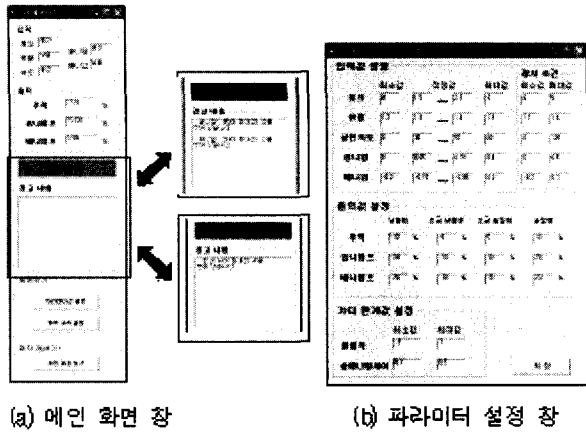
합 중심법:
$$U_0 = \frac{\int w \sum_{j=1}^l \mu_j(w)dw}{\int \sum_{j=1}^l \mu_j(w)dw} \quad (2)$$

제안한 비퍼지화 방법:
$$U_0 = \frac{\int w \left(\arg \min \sum_{j=1}^l \mu_j(w) \right) dw}{\int \left(\arg \min \sum_{j=1}^l \mu_j(w) \right) dw} \quad (3)$$

합 중심법의 경우 중첩된 모든 면적이 비퍼지화기에 사용되므로 비퍼지화기의 출력으로 나오는 계산된 값은 현재의 입력조건에서의 이상적인 출력 값과 많은 차이를 나타낼 수 있는 가능성이 많다. 하지만, 제안된 비퍼지화 방법은 무게 중심법과 비슷한 출력 결과를 내면서도 계산 시간은 빨라 본 시스템에 적합하다. 중첩되는 면적 중에서 최소 면적을 택한 이유는 Mamdani의 Min-Max 연산법을 추론 방법으로 사용하고 있기 때문이다. 즉, Mamdani의 min-max 연산법은 firing되는 규칙에서 중첩되는 최소 면적 중 최대 면적이 실제 비퍼지화기에 사용되므로 이 원칙에 충실하기 위해 중첩되는 여러 면적 중 최소 면적을 택하였다. 그림 9는 무게 중심법, 합 중심법과 제안된 비퍼지화 방법을 비교한 것이다.

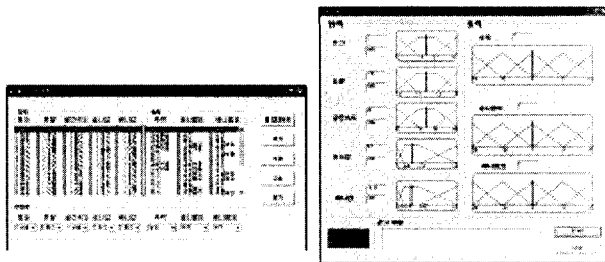
IV. 실험 결과

1. 운용자를 위한 GUI



(a) 메인 화면 창

(b) 파라미터 설정 창



(c) 퍼지 제어 규칙 설정 창

(d) 퍼지 제어 처리 과정 창

그림 10. 마이크로 터널링 시스템 운영자를 위한 GUI.
Fig. 10. GUI for system operator.

마이크로 터널링 시스템의 자동제어를 위해 필요한 파라미터들을 운영자가 용이하게 입력하고 자동제어 진행과정을 모니터링 하기 위해 Visual Basic을 이용하여 GUI를 구현 하였다. GUI는 크게 메인 화면 창, 자동제어 파라미터 설정 창, 퍼지 제어 규칙 설정 창, 퍼지 제어 처리 과정 창으로 나뉘어 진다 (그림 10).

메인 화면 창에서 자동굴진을 위한 입력변수의 상태 값, 출력 변수 값, 경고/정지 유무와 경고/정지 메시지를 모니터링 할 수 있으며 자동제어 파라미터 설정 창, 퍼지 제어 규칙 설정 창, 퍼지 제어 처리 과정 창을 활성화 시킬 수 있다. 자동제어 파라미터 설정 창에서는 퍼지 제어기의 소속 함수 값들을 결정하기 위해 각 입력 변수들의 최소 값, 적정 값, 최대 값, 정지 조건 및 출력 변수들의 조절 값들을 입력하며 퍼지 제어규칙 설정 창에서는 운영자의 굴진 운용 방식을 퍼지 규칙으로 편집하는 것이 가능하다. 퍼지 제어처리 과정 창에서는 자동제어 파라미터 설정 창에서 설정한 입/출력 변수의 조절 값에 따라 설정된 입/출력 변수에 대한 소속 함수 값을 볼 수 있으며 현재 입력되고 있는 수치적 데이터와 데이터에 따른 퍼지량을 모니터 할 수 있다.

표 1. 퍼지 규칙.
Table 1. Fuzzy rules.

입력 변수 (If)				출력 변수 (Then)				입력 변수 (If)				출력 변수 (Then)			
토크	유량	속도	송니압	배니압	추력	송니압	배니압	토크	유량	속도	송니압	배니압	추력	송니압	배니압
낮음	중간	낮음	중간	중간	높임	유지	유지	높음	낮음	낮음	중간	낮음	유지	조금높임	높임
낮음	중간	중간	중간	중간	조금높임	유지	유지	높음	낮음	낮음	중간	중간	유지	조금높임	조금높임
낮음	높음	중간	중간	중간	조금높임	높임	높임	높음	낮음	낮음	높음	중간	유지	조금낮춤	조금높임
중간	낮음	중간	중간	중간	조금낮춤	조금높임	조금높임	높음	낮음	중간	중간	중간	조금낮춤	조금높임	조금높임
중간	낮음	중간	낮음	낮음	조금낮춤	조금낮춤	유지	높음	중간	중간	중간	유지	유지	유지	유지
중간	중간	중간	중간	낮음	유지	유지	조금낮춤	높음	중간	중간	중간	중간	조금낮춤	유지	유지
중간	중간	중간	중간	중간	유지	유지	유지	높음	중간	낮음	중간	중간	조금낮춤	유지	유지
중간	중간	중간	낮음	낮음	조금낮춤	조금낮춤	유지	높음	중간	높음	높음	중간	조금낮춤	유지	유지
중간	중간	중간	높음	중간	조금낮춤	조금낮춤	유지	높음	높음	중간	중간	중간	조금낮춤	유지	유지
중간	높음	낮음	중간	중간	유지	조금높임	조금높임	높음	낮음	중간	낮음	높음	조금낮춤	낮춤	낮춤
중간	높음	중간	중간	중간	유지	조금높임	조금높임	높음	높음	높음	중간	중간	낮춤	유지	유지
높음	낮음	낮음	낮음	중간	유지	높임	유지								



(a) 굴진 현장 (b) 굴진기 시스템 (c) 원격제어시스템

그림 11. 대구 굴진 현장.
Fig. 11. A field of pipeline construction in Daegu.

2. 퍼지 규칙의 수정

자동제어를 하기 위한 입력 변수의 개수가 5개 (토크, 유량, 굴진 속도, 송니압, 배니압)이고 각각의 입력 변수에 대한 언어 변수(작다, 중간, 크다)가 3가지이므로 고려할 수 있는 모든 규칙의 경우의 수는 $3^5 = 243$ 가지이다. 하지만 이 모든 규칙을 실제 퍼지 추론에 사용할 경우 상당한 계산량이 필요하기 때문에 기타 다른 프로세싱 과정에 영향을 미칠 수 있으며 응답 속도도 늦게 발생할 수 있다. 또한 굴진작업을 할 때 243가지의 모든 경우의 수가 발생하지 않으며 이 경우의 수 가운데 많은 부분이 실제 그러한 경우가 일어나기 전에 경고 및 긴급 정지 감지 시스템에 의해 경고 상황이 발생한다. 앞장에서 언급하였듯이 퍼지 제어기에 사용되는 퍼지 규칙은 실제 굴진기를 운용하는 오퍼레이터에 의해 결정된다. 이번 굴진 실험에 적용된 퍼지 규칙은 암반과 유사한 구조의 지질을 고려하여 구축되었다(표 1 참고).

3. 실험 결과

본 절에서는 기존에 굴진현장(그림 11)에서 획득한 굴진 데이터를 이용해 개발한 퍼지 제어기의 성능을 검증한다. 개발된 굴진기계에는 실험에 필요한 각종 데이터를 획득하기 위해 디지털 센서를 장착하였으며 실시간

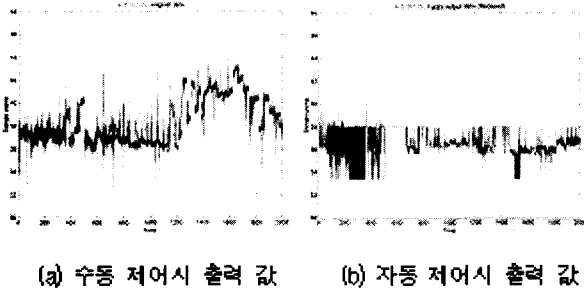


그림 12. 송니 펌프의 출력 데이터 비교.
 Fig. 12. Comparison between output data of slurry charging pressure.

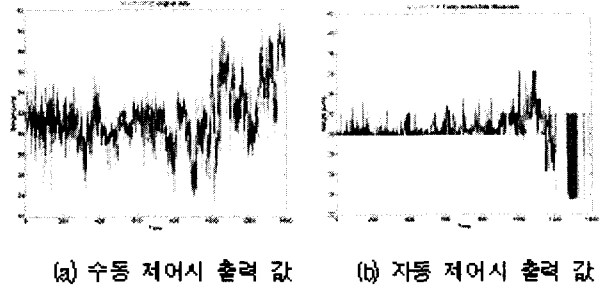


그림 14. 송니 펌프의 출력 데이터 비교.
 Fig. 14. Comparison between output data of slurry charging pressure.

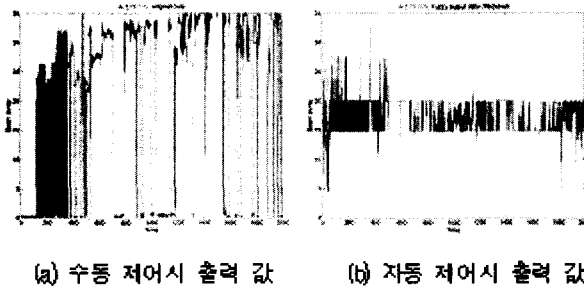


그림 13. 배니 펌프의 출력 데이터 비교.
 Fig. 13. Comparison between output data of slurry discharging pressure.

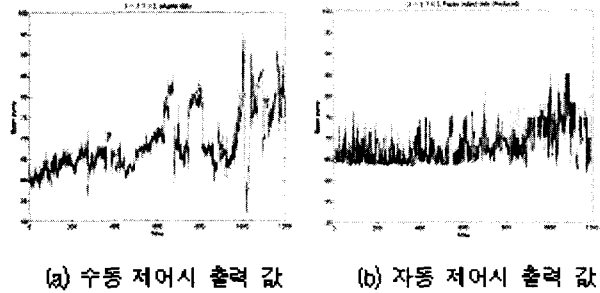


그림 15. 배니 펌프의 출력 데이터 비교.
 Fig. 15. Comparison between output data of slurry discharging pressure.

(샘플링 시간= 1/3초) 으로 전송되는 데이터를 PLC에서 수집하여 메인 제어기인 PC에서 저장하여 추후 시뮬레이션에 사용하였다.

퍼지 제어기의 출력과 각 굴진 현장데이터와의 비교 대상은 작업시 저장된 송니 펌프의 출력 값과 배니 펌프의 출력 값이다. 원압의 경우 퍼지 제어기에서 출력 값이 생성되거나 저장된 비교대상의 데이터가 없어 제외되었다. 굴진 현장 데이터는 실제 속초와 대구에서 굴진시 획득한 데이터를 사용하였으며 이 때 샘플링 주기는 데이터 획득 시간과 동일하게 1/3초로 설정하였다.

먼저 속초 굴진 현장에서 송니 펌프 출력 값에 대한 데이터 비교 결과는 그림 12와 같다. 그림 12에서 볼 수 있는 것처럼 송니 펌프의 출력 값이 특정 값을 중심으로 오실레이션 하는 것이 아니라 점차 증가/혹은 감소하는 형태를 가지고 있다. 이는 운용자의 조정이 특정지반 구조에 따라 틀이 수정된 영향으로 인한 효과로 생각할 수도 있으나 오히려 여러 가지 외부 요인으로 인한 사용자의 일관적이지 않은 조종으로 인해 나타난 결과로 보인다. 사실 운용자의 경우 객관적으로 굴진 기계를 조종한다고는 하나 조종 당시의 기분이나 외부 상황에 전혀 독립적일 수 없으며 이에 따라 불필요한 입력 신호를 줄 가능성이 다분하다. 이에 반해 자동 제어기의 경우 (그림 12b) 동일한 입력 데이터를 이용하였음에도 일관적인 출력 값을 나타내고 있다.

그림 13은 배니펌프의 출력 값을 비교한 것으로 여기에서도 앞서 설명한 바와같은 비슷한 결과를 얻을 수 있다.

대구 굴진현장의 데이터의 경우에도 속초 굴진 현장의 경우와 같은 항목들이 비교 대상이다. 그림 14는 송니 펌프, 그림 15는 배니 펌프의 출력 데이터에 대해 수동 제어 시 운용자에 의해 결정되는 출력 값과 자동 제어기에 의해 결정되는 출력 값을 비교한 것이다.

테스트 결과, 자동 제어기의 성능이 수동으로 제어했을 때의 결과보다 뛰어 남을 알 수 있다. 이렇듯 제어와 상관이 없는 여러 가지 외부 요인에 의해 운용자의 조작 성능이 떨어질 수 있는 경우에도 퍼지 제어기는 일관적인 제어 성능을 보장할 수 있는 장점을 가진다.

V. 결론 및 추후 과제

굴진 시스템은 매우 복잡하고 비선형적인 특징을 가

지고 있으며 모델을 수학적으로 정확히 구하기 어려운 시스템이다. 또한 시스템으로부터 획득한 파라미터 값이 시스템의 출력에 따라 변하기 때문에 기존의 제어 이론을 적용하기가 어렵다는 문제점을 가지고 있다. 본 연구에서는 이러한 굴진 시스템에 실제 시스템을 운용하고 있는 운용자들의 경험적 지식을 그대로 적용할 수 있는 퍼지 제어를 사용하여 토크/추력, 송/배니압의 자동제어가 가능하도록 하였다. 토크/추력 및 송/배니압의 자동제어는 운용자의 제어 방법을 그대로 따르되 굴진 환경의 변화에 신속하게 대응을 함으로써 굴진 작업의 효율성과 안정성 및 정확성을 높이는 동시에 시스템 운용자의 편의를 줄 수 있다.

앞으로 다양한 굴진현장에 개발된 시스템을 적용시켜 자동 제어의 신뢰성을 확보하여 운용자들로 하여금 개발한 시스템을 믿고 사용할 수 있도록 하는 것이 중요하다. 또한, 만약 운용자의 조작으로 인한 출력데이터 값(원압, 송니 펌프의 출력, 배니 펌프의 출력)을 마이크로 터널링 관리시스템에서 받아들일 수 있다면, 수동 조작시에 실시간으로 룰을 생성, 업데이트를 하여 바로 자동제어가 가능하도록 하는 부분에 대한 연구도 중요한 부분으로 생각된다. 실시간으로 룰을 생성, 업데이트할 수 있다면 현재 룰을 사용자가 굴진 상황에 맞게 수정하도록 하는 부분을 자동화 할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] Manabe, T., Tanno, M., Matsumoto, M., Yabuta, T.: Automatic Direction Control Technique for Microtunneling Machine. Int'l conf. of IECON, Vol. 3. IEEE Industrial Electronics Society (1999), 1295-1300
- [2] Yoneda, K., Tetsuya, H., Yoshida, K.: An Electromagnetic Sensing Technique to detect Metallic Objects for Microtunneling System. Int'l conf. of IECON, Vol. 3. IEEE Industrial Electronics Society (1997), 1265-1268
- [3] Nishimura, C., Satoh, M., Masuda, J.-I.: Forward Detection Technique for Microtunneling System. NTT review, Vol. 5, No. 6, NTT(1993), 54
- [4] 변중남, 퍼지 논리 제어, 홍릉과학출판사, (1997).
- [5] E. H. Mamdani and B. R. Gains(ed), "Fuzzy Reasoning and its Applications", Academic Press, 1981.
- [6] M. Sugeno(ed), "Industrial Applications of Fuzzy Control", North-Holland, 1985.
- [7] Wonseek Yu, Taeseung Lim, Intak Bae, and Zeungnam Bien, "Fuzzy Logic Control of a Roof Crane with Conflicting Rules", Proceedings of IFSA'93 World Congress, Seoul, Korea, vol. II, pp. 1370-1373, July 4-9, 1993.

저 자 소 개



도 준 형(학생회원)
 1999년 KAIST 전기 및 전자
 공학과 학사
 2001년 KAIST 전자전산학과
 석사
 2001년~현재 KAIST 전자전산
 학과 박사과정.

<주관심분야 : 지능제어, 영상 인식, 학습이론>



변 증 남(중신회원)
 제 30권 B편 제 10호 참조
 현재 KAIST 전자전산학과 교수



한 정 수(학생회원)
 1998년 경북대학교 공과대학
 전자공학과 학사
 2000년 KAIST 전기 및 전자
 공학과 석사
 2000년~현재 KAIST 전자전산
 학과 박사과정

<주관심분야 : 생체신호 처리 및 응용, 패턴 인식, 소프트웨어 컴퓨팅 (soft computing) 등>



남 장 현(정회원)
 1987년 충남대학교
 전자공학과 학사
 1990년 한국과학기술원
 전기 및 전자공학과 석사
 1990년~현재 한국통신(KT)
 기술연구소 근무

<주관심분야 : 마이크로터널링 관리시스템, 자동측량기술개발 등>



강 영 훈(학생회원)
 1995년 경북대학교
 전자공학과 학사
 1997년 KAIST 전기 및 전자
 공학과 석사
 2003년 KAIST 전자전산학과
 박사

2003년~현재 삼성전자 책임연구원
<주관심분야 : 지능제어, 센서 fusion 알고리즘>



박 태 동(정회원)
 1983년 아주대학교 기계공학 학사
 1985년 한국과학기술원
 생산공학과 석사
 1996년 U. of Texas Austin
 항공우주공학과 박사
 1985년~현재 한국통신(KT)
 기술연구소 근무

<주관심분야 : 정보통신 인프라설비의 개발, 마이크로터널링 등>